



方波激磁永磁无刷伺服电动机 换向过程分析

莫会成 (西安微电机研究所)

【摘要】对气隙激磁磁场为方波、相反电势为波顶宽度 120° 梯形波的永磁无刷伺服电动机的换向过程进行了分析。首先根据电动机的对称条件,求得电动机的相电压,然后根据电机模型求得电动机的稳态解,并分析了电动机在低速和高速时换向运行及参数对换向的影响,导出了一些实用的计算公式。

【叙 词】无刷电机 伺服电动机 永磁电机 换向 分析

1 引言

永磁无刷电动机换向过程及换向对电动机性能的影响很少有人涉及,尤其方波磁场激磁时,电动机相反电势一般为 120° 梯形波,线电势为 60° 梯形波,采用传统正弦波的计算公式已不能适应,同时作为伺服电动机,应能在很宽的转速范围内运行,而转速的高低、参数的大小等对电动机的换向过程和运行特性都有很大的影响。

本文针对方波激磁永磁无刷伺服电动机产生 120° 梯形波反电势的基本特点,对三相

桥式晶体管逆变器驱动永磁无刷伺服电动机的换向过程进行分析。首先根据电动机的对称条件,从电动机一个运行周期选择一个状态进行分析,并求得电机的相电压。然后根据电动机的运行特点,将一个运行状态分成换向区与导通区,分别求得其稳态解,推导出一些有用的计算公式。最后对电动机在低速和高速时换向过程及运行进行对比分析,并讨论各参数的影响。

2 对称条件

图 1 为三相星形连接永磁无刷伺服电动

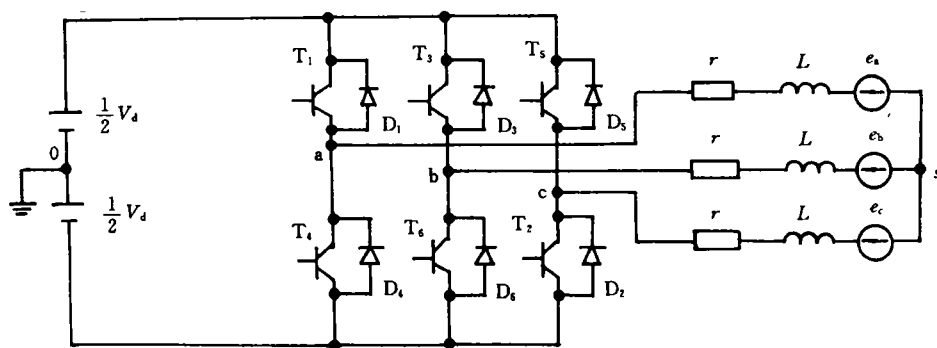


图 1 永磁无刷伺服电动机连接示意图

机及其晶体管逆变器示意图,为了便于分析,假定:

- 电动机稳态运行,且转速稳定。
- 6 晶体管具有理想的开关特性,6 个续流二极管也具有理想的开通阻断特性。
- 参数恒定,不考虑饱和的影响。

对照图 1 可以写出:

$$\left. \begin{aligned} V_{ao} &= V_{as} + V_{so} \\ V_{bo} &= V_{bs} + V_{so} \\ V_{co} &= V_{cs} + V_{so} \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

经运算可得:

$$V_{so} = \frac{1}{3}(V_{ao} + V_{bo} + V_{co}) \quad (2)$$

代入式(1),整理后可以得出电动机相电压与逆变桥 a, b, c 三点对地电压之间有:

$$\left. \begin{aligned} V_{as} &= \frac{2}{3}V_{ao} - \frac{1}{3}V_{bo} - \frac{1}{3}V_{co} \\ V_{bs} &= -\frac{1}{3}V_{ao} + \frac{2}{3}V_{bo} - \frac{1}{3}V_{co} \\ V_{cs} &= -\frac{1}{3}V_{ao} - \frac{1}{3}V_{bo} + \frac{2}{3}V_{co} \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

写成矩阵形式:

$$[V_{abs}] = [T_1][V_{abco}] \quad (4)$$

$$[T_1] = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \quad (5)$$

$[T_1]$ 为联系电动机相电压与逆变桥 a, b, c 三点电压之间的转换矩阵,因此,如果知道了逆变桥上 a, b, c 三点对地电压,通过 $[T_1]$ 即可求得电动机的相电压。

电动机在稳态运行时,由于逆变器对称触发,因而不论是 120° 逆变器还是 180° 逆变器驱动,其加在电机上的相电压之间应满足:

$$\left. \begin{aligned} V_{as}(\omega t + \frac{\pi}{3}) &= -V_{bs}(\omega t) \\ V_{bs}(\omega t + \frac{\pi}{3}) &= -V_{cs}(\omega t) \\ V_{cs}(\omega t + \frac{\pi}{3}) &= -V_{as}(\omega t) \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

同样对电机相电流也有:

$$\left. \begin{aligned} i_a(\omega t + \frac{\pi}{3}) &= -i_b(\omega t) \\ i_b(\omega t + \frac{\pi}{3}) &= -i_c(\omega t) \\ i_c(\omega t + \frac{\pi}{3}) &= -i_a(\omega t) \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

写成矩阵形式:

$$[I(\omega t + \frac{\pi}{3})] = [T_2][I(\omega t)] \quad (8)$$

$$[T_2] = \begin{bmatrix} 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \\ -1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (9)$$

$[T_2]$ 为电动机电流和电压相互之间的转换矩阵。也就是说只要能求得电动机任意 $\frac{\pi}{3}$ 期间的电流值,就可通过使用转换矩阵 $[T_2]$,求得整个周期的解。

3 电机模型

根据电机的一般理论可以写出永磁无刷伺服电动机的系统方程(参见图 1):

$$\begin{bmatrix} V_{as} \\ V_{bs} \\ V_{cs} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r & & \\ & r & \\ & & r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L_s & M & M \\ M & L_s & M \\ M & M & L_s \end{bmatrix} \cdot \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e_a \\ e_b \\ e_c \end{bmatrix} \quad (10)$$

式中 L_s ——电机绕组自感

M ——电机绕组之间的互感

由于存在:

$$i_a + i_b + i_c = 0$$

故式(10)可简化成:

$$\begin{bmatrix} V_{as} \\ V_{bs} \\ V_{cs} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r & & \\ & r & \\ & & r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L & & \\ & L & \\ & & L \end{bmatrix} \cdot \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e_a \\ e_b \\ e_c \end{bmatrix} \quad (11)$$

式中 $L = L_s - M$

电机的电磁转矩为:

$$T_e = \frac{P}{\omega_m} (e_a i_a + e_b i_b + e_c i_c) \quad (12)$$

式中 ω_m ——电机旋转角速度

P ——电机极对数

方波激磁时,永磁无刷伺服电动机通常用 120° 逆变器驱动,每一时刻电动机有两相绕组导通,每相绕组每次导通 120° (电角度),一个周期分成 6 个导通状态,每个状态持续 60° (电角度),不同状态的导通绕组及晶体管如表 1 所示。

表 1 不同状态的导通绕组及晶体管

状态编号	I	II	III	IV	V	VI
导通相	ab'	ac'	bc'	ba'	ca'	cb'
导通晶体管	1, 6	1, 2	2, 3	3, 4	4, 5	5, 6

根据上述的对称条件,只要选择任意一

个状态进行分析,就可求出整个周期的解,下面选择状态 II 进行分析,并以此状态开始点为 $t=0$ 。

4 稳态求解

如图 1 所示,电动机在状态 II 开始时,b 相 T_6 晶体管关断, T_2 导通,由于电感的存在,b 相电流 i_b 不可能突变降至零,它只能通过续流二极管 D_3 续流,逐渐衰减,直至到零,由于二极管阻断特性,二极管 D_3 关断,换向结束,电动机只有 a 相和 c 相绕组导通。因此可将 60° 状态分为换向区和导通区两个阶段,从换向开始 $t=0$ 到换向结束 t_c 时刻为换向区;从 t_c 到整个状态结束为导通区,二个区间的等效电路分别如图 2a 和图 2b 所示。

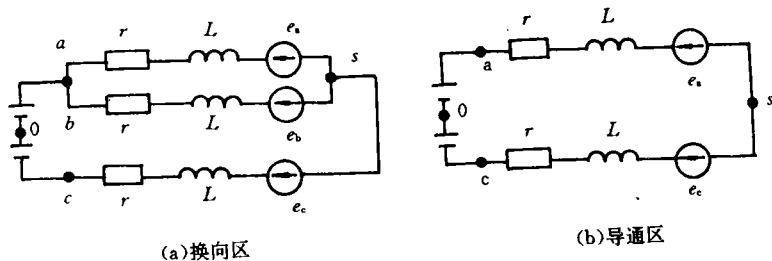


图 2 电动机等效电路

4.1 换向区的求解

根据图 2a,在换向期间:

$$\begin{bmatrix} V_{ao} \\ V_{bo} \\ V_{co} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{2} V_d \\ \frac{1}{2} V_d \\ -\frac{1}{2} V_d \end{bmatrix} \quad (13)$$

根据导得的对称条件,将上式代入式(4),可求得换向期间电机相电压为:

$$\begin{bmatrix} V_{as} \\ V_{bs} \\ V_{cs} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{3} V_d \\ \frac{1}{3} V_d \\ -\frac{2}{3} V_d \end{bmatrix} \quad (14)$$

考虑到电动机必须能正反转四象限运行,故一般取换向角等于零,即电动机相电压与反电势同相,电机相反电势为波顶宽 120° 的梯形波,线反电势为波顶宽 60° 的梯形波,其各自的相位关系如图 3 所示。

由图 3 可知,在状态 II,电机各相反电势为:

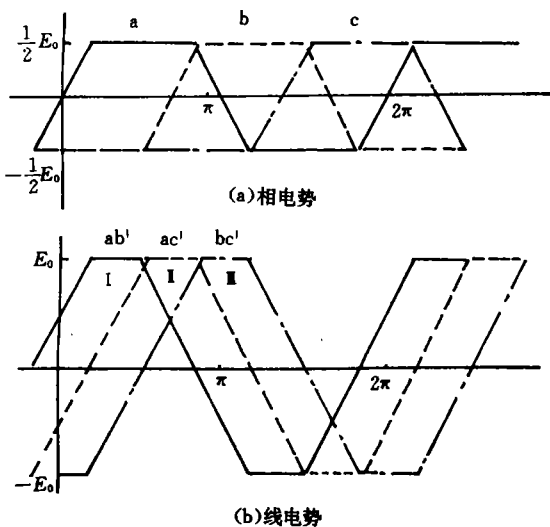


图3 电机反电势波形

$$\begin{bmatrix} e_a \\ e_b \\ e_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{2}E_0 \\ \frac{3\omega}{\pi}E_0t - \frac{1}{2}E_0 \\ -\frac{1}{2}E_0 \end{bmatrix} \quad (15)$$

将式(14)和式(15)代入方程(10),对a相和c相可得:

$$\frac{di_a}{dt} = -\frac{1}{\tau}i_a + \frac{2V_d - 3E_0}{6L} \quad (16)$$

$$\frac{di_c}{dt} = -\frac{1}{\tau}i_c + \frac{3E_0 - 4V_d}{6L} \quad (17)$$

设a相电流初值为 I_0 ,则对三相绕组:

$$\begin{bmatrix} i_a(0) \\ i_b(0) \\ i_c(0) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_0 \\ -I_0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (18)$$

解式(16)和式(17)并代入初值条件式(18),可得换向期间三相电流:

$$i_a = I_0 e^{-\frac{t}{\tau}} + (1 - e^{-\frac{t}{\tau}}) \frac{2V_d - 3E_0}{6r} \quad (19)$$

$$i_c = (1 - e^{-\frac{t}{\tau}}) \frac{3E_0 - 4V_d}{6r} \quad (20)$$

$$\begin{aligned} i_b &= -i_a - i_c \\ &= -I_0 e^{-\frac{t}{\tau}} + (1 - e^{-\frac{t}{\tau}}) \frac{V_d}{3r} \end{aligned} \quad (21)$$

换向结束时应有 $i_b = 0$,故而:

$$I_0 e^{-\frac{t_c}{\tau}} = (1 - e^{-\frac{t_c}{\tau}}) \frac{V_d}{3r} \quad (22)$$

$$t_c = -\tau \ln \frac{V_d}{V_d + 3rI_0} \quad (23)$$

可见换向过程的长短与电机电气时间常数成正比,与电机初值电流 I_0 、电阻 r 、反电势 E_0 及端电压 V_d 等都有关。同时,还有:

$$\begin{aligned} i_a|_{t=t_c} &= -i_c|_{t=t_c} = I_c \\ I_c &= \frac{(4V_d - 3E_0)I_0}{2V_d + I_0 6r} \\ &= \frac{(4V_d - 3E_0)(1 - e^{-\frac{t_c}{\tau}})}{6r} \end{aligned} \quad (24)$$

由于以上各式均是电动机初值电流 I_0 的函数,因此关键问题在于求出电机的初值电流,为此先进行导通区的求解。

4.2 导通区的求解

在导通期间, $i_b = 0$,由图2b可知:

$$\left. \begin{aligned} V_{ao} &= \frac{1}{2}V_d \\ V_{co} &= -\frac{1}{2}V_d \end{aligned} \right\} \quad (25)$$

而这时 $V_{bo} = e_b$,考虑到式(2),则:

$$\begin{aligned} V_{bo} &= e_b + V_{ao} \\ &= e_b + \frac{1}{3}(V_{ao} + V_{bo} + V_{co}) \end{aligned}$$

将式(25)代入上式,得:

$$V_{bo} = \frac{3}{2}e_b \quad (26)$$

将式(25)和(26)代入式(4)可求得:

$$\begin{bmatrix} V_{ao} \\ V_{bo} \\ V_{co} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{2}(V_d - e_b) \\ e_b \\ -\frac{1}{2}(V_d - e_b) \end{bmatrix} \quad (27)$$

将式(10)的第一行减去第三行,并注意

$i'_a = -i'_c$,整理后,得:

$$\frac{di'_a}{dt} + \frac{1}{\tau}i'_a = \frac{V_d - E_0}{2L} \quad (28)$$

解之得:

$$i'_a = I_c e^{-\frac{t-t_c}{\tau}} + (1 - e^{-\frac{t-t_c}{\tau}}) \frac{V_d - E_0}{2r} \quad (29)$$

$$t_c \leq t \leq \frac{\pi}{3\omega}$$

当 $t = \frac{\pi}{3\omega}$ 时, 状态 II 结束, 由于电动机处于稳定运行状态, 故此时应有边界条件:

$$\begin{bmatrix} i'_a(\frac{\pi}{3\omega}) \\ i'_b(\frac{\pi}{3\omega}) \\ i'_c(\frac{\pi}{3\omega}) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_0 \\ 0 \\ -I_0 \end{bmatrix} \quad (30)$$

将 $i'_a = I_0, t = \frac{\pi}{3\omega}$ 代入式(29), 得:

$$I_0 = I_c e^{\frac{t}{\tau}} e^{-\frac{\pi}{3\omega\tau}} + (1 - e^{\frac{t}{\tau}} e^{-\frac{\pi}{3\omega\tau}}) \frac{V_d - E_0}{2r} \quad (31)$$

将式(22)、(24)和式(31)联立求解, 得电机的换向时间为:

$$t_c = \tau \ln \frac{5V_d - 3E_0 - (4V_d - 3E_0)e^{-\frac{\pi}{3\omega\tau}}}{2V_d - V_d e^{-\frac{\pi}{3\omega\tau}}} \quad (32)$$

初值电流:

$$I_0 = \frac{V_d - E_0}{2r} \cdot \frac{(1 - e^{-\frac{\pi}{3\omega\tau}})}{(1 - \frac{1}{2}e^{-\frac{\pi}{3\omega\tau}})} \quad (33)$$

换向结束时的电流:

$$I_c = \frac{V_d - E_0}{2r} \cdot \frac{(4V_d - 3E_0)(1 - e^{-\frac{\pi}{3\omega\tau}})}{5V_d - 3E_0 - (4V_d - 3E_0)e^{-\frac{\pi}{3\omega\tau}}} \quad (34)$$

将以上各式分别代入相应的电流表达式, 就得到了电动机在第 II 状态的解, 利用对称条件转换矩阵 $[T_2]$ 即可求得电动机在整个周期的解。

一般, 反应电动机出力大小的是电动机的平均电流, 利用式(19)和(29)并代入式(32)~(34)可得平均电流为:

$$\begin{aligned} I_{av} &= \frac{3\omega}{\pi} \left[\int_0^{t_c} i_a dt + \int_{t_c}^{\frac{\pi}{3\omega}} i'_a dt \right] \\ &= \frac{V_d - E_0}{2r} - \frac{V_d}{6r} \cdot \frac{3\omega t_c}{\pi} \\ &= \frac{V_d - E_0}{2r} - \frac{V_d}{6r} \cdot \frac{3\omega\tau}{\pi} \end{aligned}$$

$$\cdot \ln \frac{5V_d - 3E_0 - (4V_d - 3E_0)e^{-\frac{\pi}{3\omega\tau}}}{2V_d - V_d e^{-\frac{\pi}{3\omega\tau}}} \quad (35)$$

至此就求得了方波激磁永磁无刷伺服电动机在考虑换向时的稳态性能的主要计算公式, 电动机在一个状态中各相电流的典型波形如图4所示, 从图可见, 电动机的平均电流 I_{av} 和换向结束时的电流 I_c 均小于初值电流 I_0 。

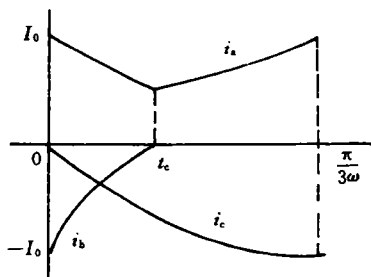


图4 电动机在一个状态中的电流

5 换向过程的分析

从式(32)~(35)可以看出, 永磁无刷伺服电动机的换向时间 t_c 、初值电流 I_0 、换向结束时的电流 I_c 及平均电流 I_{av} 等是电压 V_d 、反电势 E_0 、转速 ω 、电气时间常数 τ 及电阻 r 的函数, 且其函数关系比较复杂。但电机的换向时间与电机的电气时间常数成正比。在所加电压与反电势之值不变的情况下, 电流 I_0 、 I_c 及 I_{av} 均较传统电机的平均电流值小。由于永磁无刷伺服电动机必须从零点几转到每分数千转范围内运行, 在低速和高速时各参数对电机性能的影响不尽相同, 其计算公式可分别得到不同的简化。

在转速较低时, 由于 $\frac{\pi}{3\omega\tau} \gg 1$, 故 $e^{-\frac{\pi}{3\omega\tau}} \approx 0$, 所以式(32)~(35)分别成为:

$$t_c = \tau \ln \frac{5V_d - 3E_0}{2V_d} \quad (36)$$

$$I_0 = \frac{V_d - E_0}{2r} \quad (37)$$

$$I_c = \frac{V_d - E_0}{2r} \cdot \frac{4V_d - 3E_0}{5V_d - 3E_0} \quad (38)$$

$$I_{av} = \frac{V_d - E_0}{2r} - \frac{V_d}{6r} \cdot \frac{3\omega\tau}{\pi} \ln \frac{5V_d - 3E_0}{2V_d} \quad (39)$$

从式(36)可以看到无论 V_d 取多大,其最大的换向时间 $t_c = r \ln 2.5 < \tau$, 一般情况下取 $V_d = 1.2E_0$, 则 $t_c = 0.2237$ 。电气时间常数如果很小, 则 $I_0 = I_{av} = \frac{V_d - E_0}{2r}$, 这与不考虑换向时的电流值相等, 因为换向过程相对于一个运行状态很短, 但电流 I_c 却小于平均电流:

$$\frac{I_c}{I_{av}} = \frac{4V_d - 3E_0}{5V_d - 3E_0} \quad (40)$$

当 $V_d = 1.2E_0$ 时, I_c 就只有平均电流的 60%, 因此, 尽管换向过程很短, 电流变化却很大, 这将会引起电机电磁转矩同比例脉动。

电机在高速运行时, 一个运行状态所需时间 $\frac{\pi}{3\omega}$ 很短, 如一台 6 极电动机转速为 3333r/min 时, 转过 60° 电角度只需 1ms, 而电机电气时间常数一般为数毫秒到数十毫秒之间。为了保证电动机的正常运行, 换向过程必须在 $\frac{\pi}{3\omega}$ 之内完成, 由式(32)可得:

$$V_d < \frac{3E_0(1 - e^{-\frac{\pi}{3\omega\tau}})}{6 - 4e^{-\frac{\pi}{3\omega\tau}} - 2e^{\frac{\pi}{3\omega\tau}}} \quad (41)$$

$$0 \leq \frac{\pi}{3\omega\tau} < \ln 2$$

当 $\frac{\pi}{3\omega\tau} \rightarrow 0$, 式(41)右边等于 $\frac{3}{2}E_0$, 也就是电机转速很高时, 电机的端电压不得大于 1.5 倍反电势, 否则不能保证电动机正常换向和运行。

当 $\frac{\pi}{3\omega\tau} \ll 1$ 时:

$$e^{-\frac{\pi}{3\omega\tau}} \approx 1 - \frac{\pi}{3\omega\tau}, \quad e^{\frac{\pi}{3\omega\tau}} \approx 1 + \frac{\pi}{3\omega\tau}$$

这时换向时间近似简化为:

$$t_c = r \ln \frac{V_d + (4V_d - 3E_0) \frac{\pi}{3\omega\tau}}{V_d + V_d \frac{\pi}{3\omega\tau}}$$

$$\approx \frac{(3V_d - 3E_0)\pi}{(3\omega\tau + \pi)V_d} \tau \quad (42)$$

初值电流简化为:

$$I_0 = \frac{V_d - E_0}{2r} \cdot \frac{2\pi}{3\omega\tau + \pi} \quad (43)$$

平均电流简化为:

$$I_{av} = \frac{V_d - E_0}{2r} - \frac{V_d}{6r} \cdot \frac{3\omega}{\pi} \tau \frac{3(V_d - E_0)\pi}{(3\omega\tau + \pi)V_d} \\ = \frac{V_d - E_0}{2r} \cdot \frac{\pi}{3\omega\tau + \pi} \quad (44)$$

故可得:

$$V_d = E_0 + I_{av} \left(1 + \frac{3\omega\tau}{\pi}\right) 2r \quad (45)$$

由上面推得的几个公式可知, 电机平均电流只是初值电流的一半, 电机电流的波动很大, 而这时电机的端电压已不只是简单的反电势加上电阻压降, 或者说此时电机的等效电阻增加了 $1 + \frac{3\omega\tau}{\pi}$ 倍。因此电动机设计的转速很高时, 端电压的选取应按式(45)考虑, 但又不得超过式(41)的规定值。在系统和电机设计时应引起注意, 这种情况已在我所进行的有关课题中得到了验证。

6 结 语

影响方波激磁永磁无刷伺服电动机换向过程的因素很多, 如电机的负载大小、电气时间常数、转速、电机电压及反电势等。各因素影响的大小对不同的运行条件也不尽相同。由于换向的存在, 改变了电机电流的波形, 引起电机电磁转矩的脉动, 如果换向过程很短, 这时尽管电流变化较大, 由于惯性的存在, 也不会对电机的运行造成很大的危害; 但如果换向过程较长, 就会引起电机转速的脉动, 必须加以抑制, 因此对一般的无刷伺服系统都引入了电流反馈。在高速运行时, 由于换向的影响, 电动机各量之间的关系变化较大, 必须根据本文导得的结果, 针对具体情况进行分析, 然后设计选定电机系统各参量, 以保证能在要求的范围内正常运行。

(下转第 57 页)

3.2 输出轴失灵

电动机输出轴失灵是指电动机输出轴不转或转动不畅。故障主要原因是,爪极式永磁同步电动机内的减速齿轮损坏。由于减速齿轮采用塑料制成,其机械强度低,齿轮容易磨损或断裂。

检修时应小心撬开端盖,取出损坏的齿轮,如果减速齿轮有多个齿磨损程度较轻,可用一小起子加热或直接用小烙铁烫压整形,以尽量使齿恢复原有高度。如果齿轮磨损严重或断齿,则应更换齿轮。

3.3 运行中有异常声响

电动机在运转时发出“咯咯”异常声响,其原因是由于电动机运转日久,定子上下极爪气隙中存有磁粉和铁屑,转子转动时不够灵活以及各回转件的啮合部位缺少润滑油。

检修时拆开电动机端盖或前壳,取出转子,先用毛清扫极爪和定子腔内的磁粉和异物,并清除各回转件表面的灰尘污垢,然后在各回转部件的啮合部位涂上少许润滑脂,

处理完毕,将转子装机复原,从而排除运行中的异常声响。

3.4 温升过高

温升过高是电动机的一种不正常现象,一般由绕组受潮或绕组导线绝缘破损引起匝间短路,也有可能是磁极线圈重绕时,使用的导线线径过大或绕组匝数少绕,造成电动机温升过高。

如果绕组导线绝缘破损而引起短路,则应重新绕制线圈;对于绕组错绕,则可用万用表测量绕组电阻,其阻值小于 $8.5k\Omega$ 。此时,将漆包线退下,如果绕组匝数少绕,应补足少绕匝数。如果漆包线线径大于 $\varnothing 0.05mm$,则应更换漆包线,按原来绕线方向如数缠绕。

4 结 语

爪极式永磁同步电动机是一种比较耐用的微型电动机,只要平时使用维护得当,一般是不易出现故障的。即使出现故障,因其结构比较简单,也比较容易排除。

(上接第8页)

参 考 文 献

- 1 莫会成. 永磁交流伺服电动机的谐波分析. 微电机, 1990(1)
- 2 S. D. Sudhoff and P. C. Krause. Average-value Model of the Brushless DC 120° Inverter System. IEEE Trans. on E. C., 1990.
- 3 S. D. Sudhoff etc. Analysis and Average-value

Modeling of Line-commutated Converter-synchronous Machine Systems. IEEE Trans. on E. C., 1993.

- 4 Z. Q. Zhu etc.. Analytical Prediction of Dynamic Performance Characteristics of Brushless DC Drives. Electric Machines and Power Systems, 1992, 20

COMMUTATION ANALYSES ON PERMANENT MAGNET BRUSHLESS SERVO MOTOR EXCITED BY SQUARE WAVE

[Abstract] The thesis analyses the commutation of the permanent magnet brushless servo motor which air gap exciting magnetic field being square wave and phase back EMF being ladder-type wave with top width 120°. First, in the light of symmetry of the motor, it solves the phase voltages, then, to the motor model, obtains the steady solutions and analyses the commutation when the motor is in low and high speed and the effect of parameters on commutation. Some practical formulas are obtained.

[Keywords] brushless motor, servo motor, permanent magnet motor, commutation, analyze